

پایش جابجایی تپه‌های ماسه‌ای بادی ریگ‌یلان در بیابان لوت با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری

نعمت‌الله کریمی^{۱*}

*۱- نویسنده مسئول، استادیار، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران، پست الکترونیک: n.karimi@wri.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۲۳

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۴/۲۸

چکیده

از جمله مهمترین ویژگی‌های مناطق بیابانی ایران، وجود تپه‌های ماسه‌ای بادی است که پویایی و جابجایی آنها در گذر زمان آنها را از بسیاری از پدیده‌های ژئومورفولوژیکی دیگر متمایز کرده است. هدف از این تحقیق ارزیابی میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای یکی از بزرگترین مجتمع‌های ماسه‌ای جهان، ریگ‌یلان در شرق کویر لوت است. بدین منظور از تصاویر ماهواره Sentinel-1 که جزو ماهواره‌های راداری محسوب می‌گردد استفاده شد. در این راستا از چهار تصویر ماهواره Sentinel-1 در ابتدای تابستان سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ استفاده گردید. برای برآورد میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای منطقه مورد مطالعه از روش ردیابی انحراف (Offset Tracking) استفاده شد. در روش ردیابی انحراف مقدار جابجایی‌های افقی با محاسبه میزان انحراف یا همبستگی بین دو تصویر راداری که به صورت مشترک از یک منطقه گرفته شده‌اند محاسبه می‌شود. در این روش بهترین تطابق بین دو تصویر با به حداکثر رساندن همبستگی نرمال متقابل بین تصاویر بدست می‌آید. بر اساس نتایج بدست آمده در طول بازه زمانی مورد مطالعه، مقدار جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ریگ‌یلان از صفر در مناطق خاکی و رسوبی غیر متحرک تا حداکثر ۳ متر بر سال در هرم‌های ماسه‌ای بزرگ منطقه که عمدتاً در مرکز، غرب و جنوب ریگ متمرکز هستند متغیر بوده است. جابجایی برخان‌ها، تپه‌های طولی و عرضی و در نهایت هرم‌های ماسه‌ای به هم پیوسته قیفی شکل ریگ‌یلان در یک راستای ثابت و مشخص اتفاق نیفتاده است و در هر بخشی از آن متناسب با وضعیت مورفولوژیکی، جهت‌گیری یال‌ها و همچنین اندازه و ارتفاع تپه‌های ماسه‌ای سوگیری‌ها و جابجایی‌های متفاوتی مشاهده می‌گردد. بر اساس نتایج بدست آمده، تمام عوارض ماسه‌ای موجود در ریگ‌یلان به‌طور میانگین حدود ۰/۹۴ متر بر سال دچار جابجایی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور، تپه ماسه‌ای، برخان، جابجایی افقی، تصویر راداری، ردیابی انحراف.

مقدمه

ماسه‌ای هلالی شکل و منفردی هستند که نسبت به جهت وزش باد غالب در هر منطقه‌ای به صورت متقاطع و عرضی قرار می‌گیرند و دارای دامنه مایلی است که به سمت جهت وزش باد است. برخان‌ها اغلب بر روی سطوح هموار و سخت، جایی که مقدار ماسه در حد معین و محدود و سرعت باد ثابت و در حد متوسط باشد، تشکیل می‌شوند. از جمله مهمترین ویژگی‌های تپه‌های ماسه‌ای و به‌ویژه برخان‌ها، پویایی و تحرکات جانبی آنها است که آنها را از

تپه‌های ماسه‌ای به تپه یا رشته ارتفاعات ماسه‌ای که بر اثر وزش باد و جابجا شدن پدید آمده باشند گفته می‌شود (Arabameri *et al.*, 2015). تپه‌های ماسه‌ای بر اساس شکل مورفولوژیکی و نحوه شکل‌گیری آنها به انواع مختلفی همانند برخان‌ها، سیف‌ها، سیلک‌ها، تپه‌های ماسه‌ای طولی و عرضی، تپه‌های ماسه‌ای درهم و تپه‌های ستاره‌ای تقسیم می‌شوند (Maghsoudi *et al.*, 2018a). برخان‌ها تپه‌های

دارند، همچنین قابلیت برداشت اطلاعات در زمان‌های مختلف را دارند و کارایی بیشتری نسبت به روش‌های میدانی در شناسایی و پایش تغییرات انواع عوارض زمینی دارند (Karimi & Namdari, 2019). در سال‌های اخیر تکنیک‌های سنجش از دوری همانند ردیابی پدیده‌ها (Feature Tracking) (با استفاده از تصاویر اپتیکی و رادار) و تداخل‌سنجی راداری (Interferometry)، امکان بررسی توزیع فضایی تغییرات چند زمانه جابجایی افقی انواع پدیده‌های سطح زمین را فراهم کرده است. داده‌های رادار را می‌توان بدون از دست رفتن کیفیت با استفاده از رایانه‌های استاندارد در زمانی بسیار مناسب که با افزایش توان پردازش کاهش می‌یابد، پردازش کرد. اساس کار در اندازه‌گیری حرکات سطح زمین استفاده از تصاویر تکراری راداری در حداقل دو زمان متفاوت است. در این روش تصویری که از یک منطقه و در یک زمان مشخص برداشت می‌شود (زمان مرجع) با تصویری که در زمان دیگر توسط همان سنجنده رادار برداشت می‌شود، تلفیق می‌شود. با پرتاب ماهواره ERS-1 در جولای ۱۹۹۱ تعداد زیادی از داده‌های راداری در باند C در دسترس محققان قرار گرفت. ماهواره ERS-1 اولین ماهواره‌ای بود که داده‌های راداری مناسب برای انواع روش‌های مطالعه تغییرات سطح زمین را در دسترس قرار داد. به‌طوری‌که Goldstein برای اولین بار امکان مطالعه جابجایی یخچال‌ها توسط تصاویر راداری ERS-1 را مورد بررسی قرار داد (Goldstein et al., 1993). با پرتاب ماهواره ERS-2 در آوریل ۱۹۹۵، داده‌های راداری با اختلاف زمانی یک روز از داده‌های ERS-1 در اختیار قرار گرفت. از آن زمان به بعد، تعداد زیادی از محققان به بررسی جنبه‌های مختلف تصاویر راداری برای مطالعه جابجایی عوارض سطح زمین با استفاده از داده‌های ماهواره‌های ERS-1 و ERS-2 پرداختند. اگرچه تحقیقات اولیه با تصاویر راداری عمدتاً بر روی تخمین توپوگرافی تأکید داشتند، اما در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی بر روی استفاده از این داده‌ها برای اندازه‌گیری حرکت و تغییرات سطح زمین با استفاده از ماهواره‌های ERS-1/2، JERS-1،

سیاری از پدیده‌های ژئومورفولوژیکی دیگر متمایز نموده است (Negareh & Latifi, 2008). برخان‌ها ممکن است به مرور زمان بزرگ‌تر شوند اما حرکت ماسه در دامنه کم شیب و طولانی رو به باد و ریختن آن به پای دامنه پرشیب پشت به باد، باعث می‌شود که کل تپه به مرور زمان و به آهستگی به سمت جلو جابه‌جا شود (Maghsoudi et al., 2018b). در بیشتر بیابان‌های ایران به‌ویژه در دشت کویر و دشت لوت، برخان‌های بسیار مرتفعی دیده می‌شوند. جابجایی و پویایی تپه‌های ماسه‌ای و برخان‌ها تقریباً مورد وثوق تمامی محققان ژئومورفولوژی و علوم زمینی قرار دارد (Khosroshahi et al., 2011) و در همین راستا نیز مطالعات مختلفی برای ارزیابی دینامیک بودن اینگونه تپه‌های ماسه‌ای در داخل کشور انجام شده است. Abbasi و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از اطلاعات سرعت و جهت باد ۲۰۴ ایستگاه هواشناسی و شاخص‌های رایج تحرک‌پذیری، به ارزیابی میزان فعالیت تپه‌های ماسه‌ای کشور پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که برخی از مناطق ماسه‌ای کشور همانند دشت سیستان و تپه‌های ماسه‌ای دشت کویر از فعالیت قابل توجهی نسبت به سایر مناطق ایران برخوردار هستند. اگرچه در این تحقیق و برخی مطالعات مشابه تا حدودی میزان تحرک‌پذیری تپه‌های ماسه‌ای کشور با استفاده از مدل‌های ژئومورفولوژیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است، اما تاکنون مطالعه واحدی که بتواند این پویایی را به صورت کمی نشان بدهد انجام نشده است. این در حالی است که امروزه با توسعه فناوری‌های نوینی همانند سنجش از دور امکان مطالعه و بررسی این مسئله و سایر موضوعات مشابه دیگر نیز فراهم شده است. در واقع سنجش از دور تنها ابزار موجودی است که می‌توان با استفاده از آن اقدام به تهیه اطلاعات از عوارضی نمود که هم در پهنه‌های وسیعی گسترده شده‌اند و هم در مناطق صعب‌العبور و با دسترسی سخت واقع شده‌اند (Goudarzi et al., 2006). مقایسه میان روش‌های میدانی و سنجش از دوری به روشنی بیانگر آن است که تصاویر ماهواره‌ای با توجه به اینکه محدوده وسیع‌تری را پوشش می‌دهند، توان تفکیک مکانی بالاتری هم

تکنیک تداخل‌سنجی با محدودیت روبه‌رو شده است، جایگزین ارزشمندی است. نتایج این تکنیک در یخچال Muztagh Kuksai نشان‌دهنده دقت ۳۰ سانتی‌متری آن بوده است. Kumar و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از داده‌های با قدرت تفکیک بالای SAR، میزان جابجایی سطوح یخچالی را در شمال غربی هیمالیا استخراج کردند. در این مطالعه مشخص شد در تصاویر با فواصل زمانی بیش از ۱ روز هم جابجایی در داده‌ها دیده می‌شود و میزان همدوسی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در این مطالعه از داده‌های TerraSAR-X (TS-X) استفاده شد. Yan و همکاران (۲۰۱۶)، الگوی جابجایی یخچال را در مناطق کوهستانی Chongce با ترکیب تکنیک‌های ردیابی پیکسل بر اساس کثرت و تکنیک D-InSAR بر اساس اختلاف فاز و روش‌های تداخل‌سنجی چند روزه‌ای انجام دادند. در این مطالعه از داده‌های باند L سنجنده ALOS با فواصل زمانی ۴۶ روز استفاده شد. نتایج تحقیق نشان‌دهنده ارتباط بسیار زیاد میان خروجی‌های به‌دست‌آمده از هر یک از سه روش استفاده شده بود. Sánchez-Gómez و Navarro (۲۰۱۷)، به مطالعه جابجایی یخچال‌های جنوب کانادا با استفاده از داده‌های Sentinel-1 به کمک روش‌های ردیابی انحراف و تکنیک D-InSAR پرداختند. در این مطالعه از ماهواره Sentinel-1 استفاده شد. نتایج تحقیق بیانگر آن بود که استفاده همزمان از این دو تکنیک موجب بهبود دقت نتایج به‌دست آمده می‌شود و این دو روش مکمل یکدیگر هستند. همچنین مشاهدات نشان‌دهنده جابجایی یخچال‌ها بین ۱۲ تا ۳۳ متر در سال بود و در برخی مناطق تا ۱۵۰ متر نیز جابجایی مشاهده شد. Winsvold و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مجموعه زمانی داده‌های SAR از Sentinel-1A و RADARSAT-2 ویژگی‌های سطحی و زیرسطحی یخچال را در یخچال‌های نوژ و اسلوبارد استخراج کردند. آنان نتایج به‌دست آمده را با داده‌های اپتیکی Sentinel-2A و Landsat-8 مقایسه کردند. در کنار مطالعه یخچال‌های کوهستانی (به‌عنوان یکی از دینامیک‌ترین عوارض ژئومورفولوژیکی سطح زمین)، مطالعات مختلفی نیز بر روی

Envisat و RADARSAT انجام شده است (Berardino *et al.*, 2002; Squarzone *et al.*, 2003). با توجه به پیشرفت‌های انجام شده، کاربردهای داده‌های راداری در سال‌های اخیر در مطالعات جابجایی سطحی پدیده‌های مختلفی همانند یخچال‌ها، زمین‌لغزه‌ها و زمین‌لرزه‌ها جایگاه ویژه و مهمی یافته است. Li و همکاران (۲۰۱۴)، مقدار جابجایی یخچال‌های کوهستانی را با استفاده از داده‌های راداری و با کمک روش ردیابی شدت بررسی کردند. Huang و Li (۲۰۱۱)، به مقایسه کاربرد داده‌های SAR و داده‌های اپتیکی در استخراج سرعت جابجایی عوارض پویای سطح زمین با استفاده از تکنیک ردیابی عوارض (Feature Tracking) بر روی مناطق کوهستانی Tianshan در چین پرداختند. در این مطالعه از داده‌های اپتیکی و SAR ماهواره ALOS استفاده شد. آنان بیان کردند که پس از انجام سازوکارهای مختلف، تصاویر اپتیکی نیاز به زمین‌مرجع شدن دارند. در حالی که انجام این مرحله برای تصاویر SAR ضروری نیست. تصحیحات ارتفاعی در مناطق کوهستانی برای داده‌های SAR سخت است، بنابراین عملیات هم‌مختصات‌سازی (Co-Registered) در این داده‌ها مناسب می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده آن بود که استفاده همزمان از این دو داده به عنوان داده‌های مکمل در افزایش دقت تعیین جابجایی تأثیر بسزایی دارد. همچنین آنان بیان کردند به‌علت تغییر ویژگی‌های بازپخش سطوح عوارضی همانند یخچال‌ها، همدوسی سطوح زمین در فواصل زمانی بیشتر از ۳۵ روز از بین می‌رود (میزان همدوسی قابل تعیین نیست). در این مطالعه از چهار تصویر باند C سیستم ENVISAT/ASAR در مجموع فواصل زمانی ۱۰۵ روز استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده جابجایی یخچال‌ها با سرعت ۳۰ سانتی‌متر در سال بود. Yan و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از داده‌های SAR رادار روزه مصنوعی ALOS/PALSAR و به‌کمک تکنیک Normalized Cross-Correlation سرعت جابجایی یخچال‌های آلی را استخراج کردند. آنان بیان کردند که این روش در زمانی که به‌علت کاهش همبستگی، استفاده از

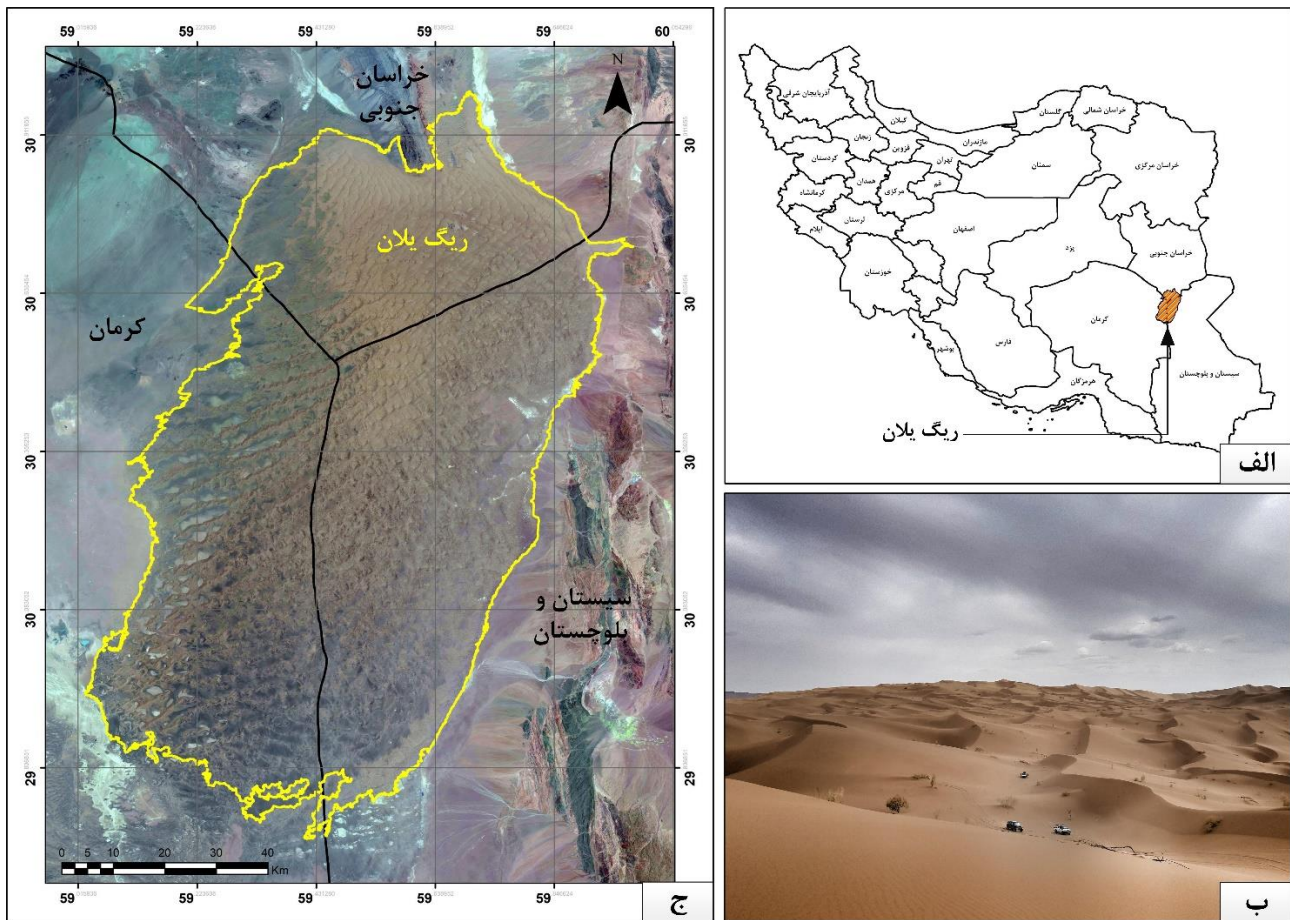
با استفاده از شاخص‌ها و مدل‌های تحرک‌پذیری) انجام شده است، اما بر اساس بررسی‌های انجام شده می‌توان بیان کرد که این تحقیق جزو اولین مواردی است که به صورت کمی و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری اقدام به پایش جابجایی تپه‌های ماسه‌ای در داخل کشور می‌نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، ریگ یلان کویر لوت به‌عنوان یکی از بزرگترین تپه‌های ماسه‌ای جهان مورد مطالعه قرار گرفت. ریگ یلان پهنه ماسه‌ای وسیعی است که در شرق استان کرمان، شمال غربی استان سیستان و بلوچستان و جنوب استان خراسان جنوبی قرار دارد. ریگ یلان شکلی شبیه به مستطیل و گستره‌ای شمالی-جنوبی دارد. فاصله شمال تا جنوب این ریگ حدود ۱۵۰ کیلومتر و فاصله شرقی-غربی آن حدود ۷۰ کیلومتر است. این ریگ از غرب به چاله مرکزی لوت، از شمال به دهسلم، از شرق به نصرت‌آباد، ارتفاعات اسپی و اوخوران و از جنوب و جنوب غربی به لوت زنگی احمد و کال شور لوت محدود می‌گردد و تا بلوچ آب ادامه می‌یابد. ارتفاع کف دشت از سطح آب‌های آزاد در نواحی حاشیه غربی ریگ یلان، در حدود ۵۵۰ متر و در نواحی شرقی در حدود ۸۳۰ متر است. تپه‌های ماسه‌ای این منطقه از خانواده تپه‌های عرضی بوده و اساساً از رشته‌های نامتقارن تشکیل شده‌است؛ تقریباً بیشتر اشکال تراکمی ماسه‌ای مانند برخان در شرق ریگ، تپه‌های طولی در جنوب غرب ریگ و عرضی در شرق ریگ، هرم‌های ماسه‌ای به هم پیوسته (جنوب ریگ) و تپه‌های ماسه‌ای قیفی‌شکل در وسط ریگ دیده می‌شود. بر اساس مطالعه Abbasi و همکاران (۲۰۱۹)، ریگ یلان بر اساس شاخص تحرک‌پذیری-Lancaster که از جمله معروفترین شاخص‌های برآورد میزان تحرک تپه‌های ماسه‌ای است، به‌عنوان یکی از فعال‌ترین تپه‌های ماسه‌ای ایران طبقه‌بندی شده است.

اندازه‌گیری میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از تصاویر راداری انجام شده است. به‌عنوان مثال Song (۲۰۲۰) با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری، تغییرات زمانی- مکانی تپه‌های ماسه‌ای مناطق بیابانی را مورد ارزیابی قرار داده است. Abdelkareem و همکاران (۲۰۲۰) نیز در خشک‌ترین بیابان‌های عربستان، توانایی تصاویر راداری و اپتیکی را در مطالعه میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیق ضمن استفاده همزمان از تصاویر راداری Sentinel-1 و تکنیک تداخل‌سنجی راداری، از داده‌های اپتیکی با قدرت تفکیک مکانی بالا نیز برای برآورد میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای استفاده شده است؛ به‌نحوی که نتیجه‌گیری شده است که میزان جابجایی این تپه‌های ماسه‌ای کاملاً به عواملی همانند توپوگرافی زمین، شیب زمین و سرعت و جهت وزش باد وابسته است و نقش فعالیت‌های انسانی در این جابجایی‌ها بسیار ناچیز است. استفاده از تکنیک ردیابی انحراف نیز به دلیل سهولت در اجرا و دقت نسبتاً بالای آن، مکرراً برای مطالعه جابجایی تپه‌های ماسه‌ای و عوارض مشابه با آن مورد استفاده قرار گرفته است (Wang et al., 2016). Cia و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از این تکنیک، میزان جابجایی‌های اتفاق افتاده به دلیل زمین‌لغزه را با کمک تصاویر راداری برداشت شده از پهپادها (UAVSAR) در آمریکا انجام دادند و نتیجه گرفتند که این روش قابلیت‌های بسیاری در مطالعه تغییرات افقی سطح زمین دارد. هدف اصلی این تحقیق مطالعه تغییرات و جابجایی‌های سطحی یکی از بزرگترین مجتمع‌های ماسه‌ای دنیا (ریگ یلان) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری است. بدین‌منظور در طول چهار سال متوالی (از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰) از تصاویر ماهواره Sentinel-1 که جزو ماهواره‌های راداری با قدرت تفکیک مکانی و زمانی نسبتاً بالا محسوب می‌گردد استفاده شد. همچنین در بین انواع روش‌ها و الگوریتم‌های موجود، از روش ردیابی انحراف (Offset Tracking) برای برآورد این جابجایی‌ها استفاده گردید. اگرچه تاکنون مطالعات محدودی در مورد جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ایران (به‌ویژه



شکل ۱- الف) موقعیت جغرافیایی ریگ یلان، ب) تصویر ریگ یلان (گرفته شده توسط آقای وحید ظهیری)، ج) تصویر ماهواره Landsat ریگ یلان (گرفته شده در تابستان سال ۱۳۹۹)

داده‌های مورد استفاده

مجموعه ماهواره‌های Sentinel از جمله ماهواره‌هایی است که توسط اتحادیه اروپا به فضا پرتاب شده و هفت مأموریت برای آنها تعریف شده است. در این مأموریت‌ها برای پایش سطح زمین، اقیانوس‌ها و اتمسفر به صورت راداری و اپتیکی از سطح زمین تصویربرداری می‌شود. در هر مأموریت از دو ماهواره برای تصویربرداری از کل سطح زمین و تهیه داده‌های قابل اعتماد استفاده می‌گردد. نام جدید برنامه مشاهدات زمینی کمیته اروپایی Copernicus است که قبلاً به نام GMES پایش جهانی محیط و ایمنی شناخته شده بود. از بین ماهواره‌های مختلفی که در این پروژه تعریف شده است، ماهواره Sentinel-1 می‌باشد که یک ماهواره

راداری است و برای برآورد میزان فرونشست و جابجایی‌های سطحی زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد و در این تحقیق نیز از همین ماهواره برای برآورد میزان جابجایی‌های افقی تپه‌های ماسه‌ای ریگ یلان استفاده گردید. Sentinel-1 اولین ماهواره برنامه Copernicus آژانس فضایی اروپاست. مأموریت Sentinel-1 شامل دو ماهواره است که سنجنده SAR را حمل می‌کنند و به‌عنوان Sentinel-1A و Sentinel-1B شناخته می‌شوند. Sentinel-1A در ۳ آوریل ۲۰۱۴ و Sentinel-1B در ۲۲ آوریل ۲۰۱۶ در مدار قرار گرفته‌اند (Sánchez-Gómez & Navarro, 2017). این ماهواره‌ها قادر به برداشت تصاویر در باند C (5.4 GHz) توسط سنجنده‌های SAR در شب و

یک، دو نوع محصول محدوده سنجش شده زمینی (GRD (Ground Range Detected)) و مجموعه تک نگاه (SLC (Single Look Complex)) ارائه شده است. تصاویر GRD تنها شامل اطلاعات دامنه است. در حالی که تصاویر SLC هر دو پارامتر دامنه و فاز را شامل می‌شود. در این مطالعه از داده‌های GRD برای استخراج اطلاعات جابجایی تپه‌های ماسه‌ای استفاده گردید. بدین منظور از چهار تصویر مختلف Sentinel-1 در فاصله سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. به منظور حذف اثرهای ناشی از رطوبت خاک و پوشش‌های گیاهی احتمالی، تمام تصاویر در ابتدای فصل تابستان انتخاب گردید.

روز و مستقل از شرایط آب‌وهوایی هستند. Sentinel-1A در ارتفاع ۷۰۰ کیلومتری از زمین قرار دارد. دوره بازگشت این سنجنده ۱۲ روزه می‌باشد که به کمک Sentinel-1B به ۶ روز می‌رسد. مدار این ماهواره به صورت خورشید آهنگ و نزدیک به قطب است. از جمله کاربردهای این ماهواره می‌توان به مواردی همانند پایش مناطق یخ‌بسته دریاها و محیط‌زیست شمالگان و مراقبت از محیط‌های دریایی، پایش مخاطرات سطح زمین، نقشه‌برداری از سطح زمین، جنگل، آب و خاک و پشتیبانی امداد رسانی را در مواقع بحران و مخاطرات طبیعی نام برد. داده‌های اخذ شده توسط Sentinel-1 در سه سطح مختلف گرفته می‌شود. در سطح

جدول ۱- مشخصات داده‌های مورد استفاده

ردیف	تاریخ گرفتن تصویر	نام و عنوان تصویر	سطح تصویر	قدرت تفکیک مکانی
۱	۱۵-۰۷-۲۰۱۷	S1A_IW_GRDH_1SDV_20170715T140124_20170715T140149_017483_01D39A_1134	GRD	۱۰×۱۰
۲	۱۰-۰۷-۲۰۱۸	S1A_IW_GRDH_1SDV_20180710T140130_20180710T140155_022733_0276B1_23D0	GRD	۱۰×۱۰
۳	۱۷-۰۷-۲۰۱۹	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190717T140136_20190717T140201_028158_032E34_1E1F	GRD	۱۰×۱۰
۴	۲۰-۰۶-۲۰۲۰	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200629T140142_20200629T140207_033233_03D9A5_0693	GRD	۱۰×۱۰

روش تحقیق

محاسبات انواع جابجایی‌های افقی و همچنین تغییرات ارتفاعی توسط بسیاری از تصاویر اپتیکی و راداری امکان‌پذیر است. از محدودیت‌های تصاویر اپتیکی علاوه بر قدرت تفکیک پایین مکانی و عدم امکان تشخیص عوارض کوچک، این است که تنها قادر به محاسبه جابجایی در بعد افقی می‌باشند و جابجایی‌های اتفاق افتاده در راستای عمودی و ارتفاعی را تشخیص نمی‌دهند. به‌طور کلی دو روش برای بازیابی

پارامترهای جابجایی حرکت عوارض سطح زمین (شامل جابجایی‌های افقی و عمودی) استفاده می‌شود: الف) روش ردیابی انحراف (Offset Tracking) که خود شامل مجموعه‌ای از الگوریتم‌های مبتنی بر ردیابی است و به‌طور عمده برای جابجایی‌های افقی مورد استفاده قرار می‌گیرد و ب) روش تداخل‌سنجی راداری (Interferometry) که بر مبنای استفاده از فاز و تداخل‌سنجی است (Wang et al., 2016) و به‌طور عمده برای پایش جابجایی‌های عمودی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

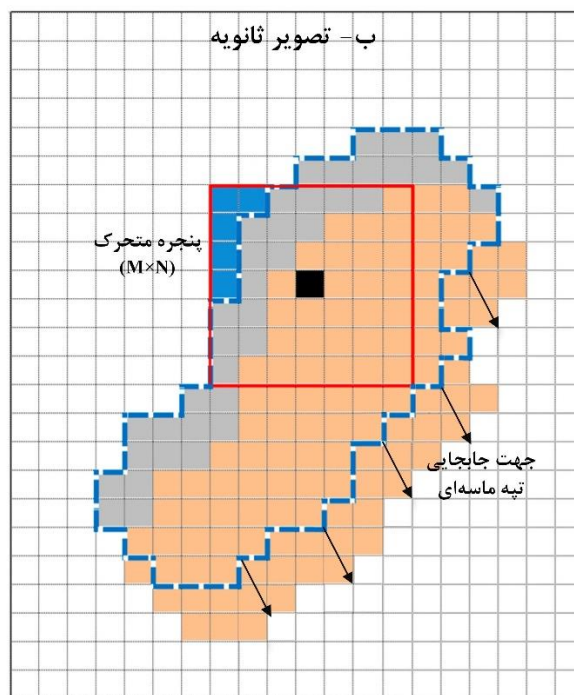
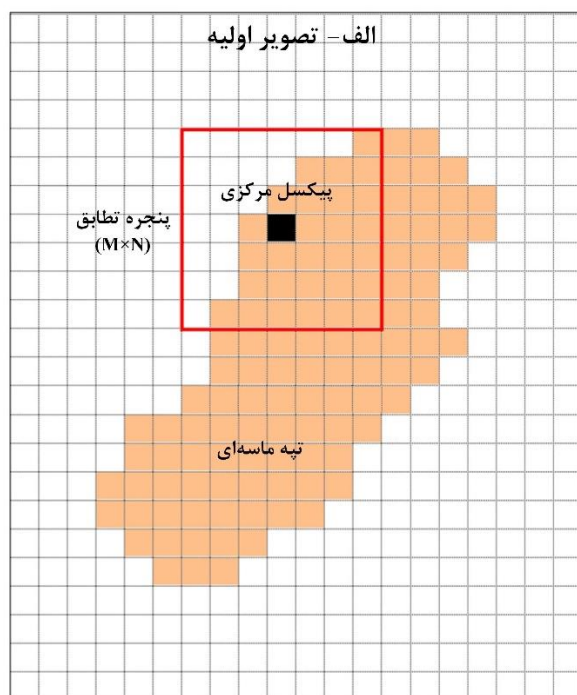
پیکسل انجام می‌گردد. این روش به‌طور عمده متکی بر الگوریتم‌های مبتنی بر همبستگی بین تصاویر است. روش ردیابی شدت که گاهی از آن تحت عنوان ردیابی همبستگی (Coherence Tracking) نیز یاد می‌شود، در این تحقیق نیز از همین روش استفاده شده است، به‌نحوی که به‌عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی همبستگی متقابل (Cross-Correlation) شناخته می‌شود که به‌طور معمول بر اساس الگوریتم همبستگی پیکسل به پیکسل تصویر انجام می‌گردد. در میان روش‌های مختلف همبستگی معمولاً از روش‌های Maximum Normalized Cross Correlation (NCC) Multi-Resolution Wavelet likelihood (ML) Decomposition استفاده می‌شود. با این حال موفقیت روش‌های ردیابی شدت به بافت سطح عوارض موجود در سطح زمین وابسته است که دقت و استحکام تطبیق را تسهیل می‌کند. به‌طوری که اگر سطوح زمین دارای الگوها یا بافت‌های متمایز نباشد، نتیجه تطبیق به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. ردیابی شدت بیشتر با هدف مطالعات جابجایی در اهدافی که سرعت جریان حرکتی در آنها زیاد است یا در مواردی که فاصله بین دو برداشت داده طولانی است، انجام می‌شود. به همین دلیل است که در این تحقیق فاصله بین دو برداشت حداقل به میزان یکسال در نظر گرفته شده است تا میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای به مقدار استاندارد برای پایش با استفاده از این روش رسیده باشد. روش ردیابی همبستگی مقدار جابجایی‌های افقی را با محاسبه میزان انحراف یا همبستگی بین دو تصویر راداری که به‌صورت مشترک از یک منطقه گرفته شده‌اند محاسبه می‌کند. در واقع این روش بهترین تطابق بین دو تصویر را با به حداکثر رساندن همبستگی نرمال متقابل بدست می‌آورد. در شکل ۲ نحوه محاسبه جابجایی‌های افقی با استفاده از این روش نشان داده شده است. همچنین نحوه محاسبه همبستگی نرمال متقابل عبارت است از:

در روش ردیابی انحراف که از جمله متداولترین روش‌های مطالعه تغییرات جابجایی افقی است، اطلاعات دامنه داده‌های راداری که معمولاً به شکل Intensity Image است مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش تکنیک‌های ردیابی (Track) عوارض سطحی و همچنین الگوهای نقطه‌ای (Speckle) در جفت تصاویر راداری هم مختصات شده در دو زمان متفاوت اعمال می‌گردد. این روش در زوج تصاویر راداری که با همبستگی و انسجام (Coherence) اندک مشخص شده‌اند قابل استفاده است. همچنین بررسی عوارض مجزا (به‌عنوان مثال شکاف‌های عمیق) می‌تواند توسط تصویربرداری اپتیکی با همین روش انجام شود (Luckman *et al.*, 2003). ردیابی انحراف به‌طور عمده از طریق روش‌های همبستگی انجام می‌شود. به‌طوری که جابجایی نقطه یا یک عارضه بر روی سطح اندازه‌گیری می‌شود. روش ردیابی انحراف خود شامل سه روش ردیابی شدت (Intensity Tracking)، ردیابی عوارض (Feature Tracking) و ردیابی نقاط (Speckle Tracking) است. روش ردیابی عوارض با پایش کردن و ردیابی عوارضی مانند عوارض فرسایشی که در تصاویر قابل مشاهده هستند میزان تغییرات سطحی را تعیین می‌کنند (Luckman *et al.*, 2006). برای انجام این کار باید از جفت تصویرهای متوالی هم مختصات شده و با توان تفکیک مکانی بالا استفاده کرد. این روش به‌طور عمده در تصاویر اپتیکی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد اما در داده‌های راداری به علت امکان نفوذ در عوارض سطحی و یا ناهمگنی‌ها و شیارهای داخلی موجود در سطح زمین (Massom & Lubin, 2006) نسبت به سایر روش‌ها کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش ردیابی نقاط را می‌توان به‌عنوان روش بهبود یافته روش ردیابی عوارض در نظر گرفت. در مقایسه با روش ردیابی عوارض که بر عوارض مرئی مانند شکاف‌ها متکی هستند، در این روش دقت در مرحله هم مختصات‌سازی با توان تفکیک در حد یک دهم

$$\rho = \frac{|\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (m_{i,j} - \mu_m)(s_{i,j} - \mu_s)|}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (m_{i,j} - \mu_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (s_{i,j} - \mu_s)^2}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

و μ_m و μ_s نیز به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر میانگین شدت در پنجره تصاویر اولیه و ثانویه می‌باشند.

در رابطه ۱ $M \times N$ نشان‌دهنده اندازه پنجره، m_{ij} و s_{ij} نیز به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر شدت (Intensity) ثبت شده در پیکسل شماره i و j تصویر راداری اولیه و ثانویه هستند



شکل ۲- نحوه عملکرد روش ردیابی بر اساس همبستگی نرمال متقابل بر روی تپه‌های ماسه‌ای. الف- تصویر اولیه (قبل از جابجایی تپه ماسه‌ای)، ب- تصویر ثانویه (بعد از جابجایی تپه ماسه‌ای)

در تصویر ب پیکسل‌های آبی و سفید نشان‌دهنده مناطق ثابت و بدون تحرک، پیکسل‌های نارنجی نشان‌دهنده مناطق متحرک و پیکسل‌های خاکستری نشان‌دهنده مناطق تازه رخنمون یافته است.

سطحی است. به طوری که بیشترین خطاها معمولاً در مرز بین عوارض (همانند مرز تپه‌های ماسه‌ای یا مرز مناطقی که دچار زمین‌لغزه شده‌اند) مشاهده می‌گردد. این مشکل با افزایش اندازه پنجره تطابق معمولاً بیشتر شده و با افزایش این پنجره میزان خطا نیز افزایش می‌یابد. به همین دلیل در این تحقیق اندازه پنجره تطابق با توجه به اندازه تقریبی تپه‌های ماسه‌ای در حدود 7×7 در نظر گرفته شده است.

مهمترین مرحله در برآورد میزان جابجایی، نحوه تعریف پنجره‌های تطابق است. زیرا با توجه به اینکه از قبل محدوده تپه‌های ماسه‌ای و مرز بیرونی هر یک از آنها مشخص نیست، لازم است ابتدا با استفاده از مقادیر اولیه برای

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، پنجره تطابق (مربع قرمز رنگ) شامل پیکسل‌هایی است که هم مشمول جابجایی و حرکت شده‌اند (پیکسل‌های نارنجی) و هم شامل پیکسل‌های ثابت و بدون حرکت است (پیکسل‌های سفید). بر اساس این روش، زمانی که یک پیکسل در داخل محدوده جابجایی قرار می‌گیرد، پیکسل‌های سفید و خاکستری داخل پنجره تطابق دچار عدم همبستگی (Decorrelation) با پیکسل‌های سفید داخل همان پنجره می‌شوند و همین امر منجر به کاهش قابل توجه مقدار همبستگی نرمال متقابل بین دو تصویر می‌شود. از جمله مشکلات مربوط به این روش، مناطق حاشیه‌ای عوارض

ماسه‌ای این منطقه از یکسال به سال بعد تغییرات جزئی و محلی را از خود نشان می‌دهد، اما الگوی مکانی تغییرات آنها در سالیان متمادی تقریباً شبیه به یکدیگر است و اختلاف اساسی در بین آنها مشاهده نمی‌شود. میانگین جابجایی تپه‌های ماسه‌ای محدوده ریگ‌یلان در فاصله سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۸، ۲۰۱۸-۲۰۱۹ و ۲۰۱۹-۲۰۲۰ به ترتیب برابر با ۰/۸۸، ۰/۹۶ و ۱ متر بر سال بوده است. اگرچه به نظر می‌رسد که به تدریج سرعت حرکت تپه‌های ماسه‌ای این منطقه به تدریج در حال افزایش است، اما باید بیان کرد که نوسانهای یادشده جزئی بوده و این اختلاف‌ها معنی‌دار نیست. بر اساس میانگین‌گیری سرعت کل تپه‌های ماسه‌ای یادشده در فاصله سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰، میانگین سرعت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ۰/۹۴ متر بر سال محاسبه شده است. بنابراین می‌توان بیان کرد که تپه‌های ماسه‌ای و برخان‌های واقع در ریگ‌یلان سالانه در حدود ۱ متر دچار جابجایی و حرکت شده‌اند. در کنار میانگین جابجایی‌های یادشده، نکته قابل توجه انحراف معیار نسبتاً بالای میزان جابجایی‌ها در محدوده ریگ‌یلان است. به طوری‌که انحراف معیار جابجایی تپه‌های ماسه‌ای این منطقه در فاصله سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۸، ۲۰۱۸-۲۰۱۹ و ۲۰۱۹-۲۰۲۰ به ترتیب در حدود ۰/۶۶، ۰/۸ و ۰/۷۲ متر بر سال بوده است. دلیل انحراف معیارهای نسبتاً بالای یادشده در سالیان مختلف وجود انواع پدیده‌های مورفولوژیکی و انرژی باد متغیر در داخل محدوده ریگ است. به طوری‌که در این محدوده از سنگ بستر انواع تپه‌های ماسه‌ای بزرگ و کوچکی یافت می‌شود که هر یک رفتار دینامیکی متفاوتی از خود بروز می‌دهند.

اگرچه تاکنون مطالعه مشابه دیگری به منظور مقایسه این دستاوردها انجام نشده است، اما Maghsoudi و همکاران (۲۰۱۸b) در فاصله سال‌های ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۴ با استفاده از عکس‌های هوایی (گرفته شده در سال‌های ۱۳۳۴، ۱۳۴۸ و ۱۳۴۷) و تصاویر ماهواره‌ای موجود در گوگل ارث (گرفته شده در سال ۱۳۸۴) میزان جابجایی دو عدد از برخان‌های روستای پوشویه از توابع شهداد را در شرق شهر کرمان مورد

آزموت و دامنه انحراف‌ها، مقادیری بهینه برای آنها محاسبه گردد و بعد با تعدیل مقادیر بدست آمده پنجره‌های مناسبی برای اندازه‌گیری میزان جابجایی‌ها تعریف شود. از این رو با عنایت به این موضوع، مراحل برآورد جابجایی با استفاده از روش همبستگی متقابل را می‌توان به شرح زیر اعلام کرد.

الف) ثبت (Co-registration) دو تصویر راداری اولیه (قبل از وقوع جابجایی) و ثانویه (بعد از وقوع جابجایی) نسبت به یکدیگر؛

ب) برآورد مقادیر اولیه برای شاخص‌های آزیموت (Azimuth) و دامنه انحراف‌ها (Range Offsets) بین تصاویر اولیه و ثانویه با استفاده از روش‌های مرسوم و معمول همبستگی متقابل نرمال (NCC)؛

ج) آستانه‌گذاری برای مقادیر آزیموت و دامنه انحراف‌ها و تولید دو تصویر ماسک برای تصاویر اولیه و ثانویه؛

د) تولید مقادیر جدید برای آزیموت و دامنه انحراف با استفاده از پنجره‌های انطباقی که با استفاده از تصاویر ماسک ایجاد شده در مرحله قبل بهینه شده‌اند؛

ه) تناسب‌سازی رابطه انحراف مداری (Orbit Offsets) با انتخاب پیکسل‌هایی از مناطق ثابت و بدون تحرک؛

و) کسر معادلات انحراف مداری و تولید آزیموت و دامنه جابجایی تپه‌های ماسه‌ای.

خاطر نشان می‌گردد که مراحل یادشده در محیط نرم‌افزار SNAP (Sentinel Application Platform) که یک نرم‌افزار رایگان سنجش از دور برای تفسیر و پردازش تصاویر ماهواره‌ای Sentinel است اجرا و پیاده‌سازی شده است.

نتایج

در شکل ۳ نتایج تحلیل داده‌های ماهواره Sentinel-1 با استفاده از روش ردیابی انحراف در فاصله سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نمایان است، بر اساس نتایج بدست آمده تپه‌های ماسه‌ای ریگ‌یلان در هر سال از صفر تا حداکثر ۳ متر بر سال از خود جابجایی نشان داده‌اند. اگرچه مقدار جابجایی تپه‌های

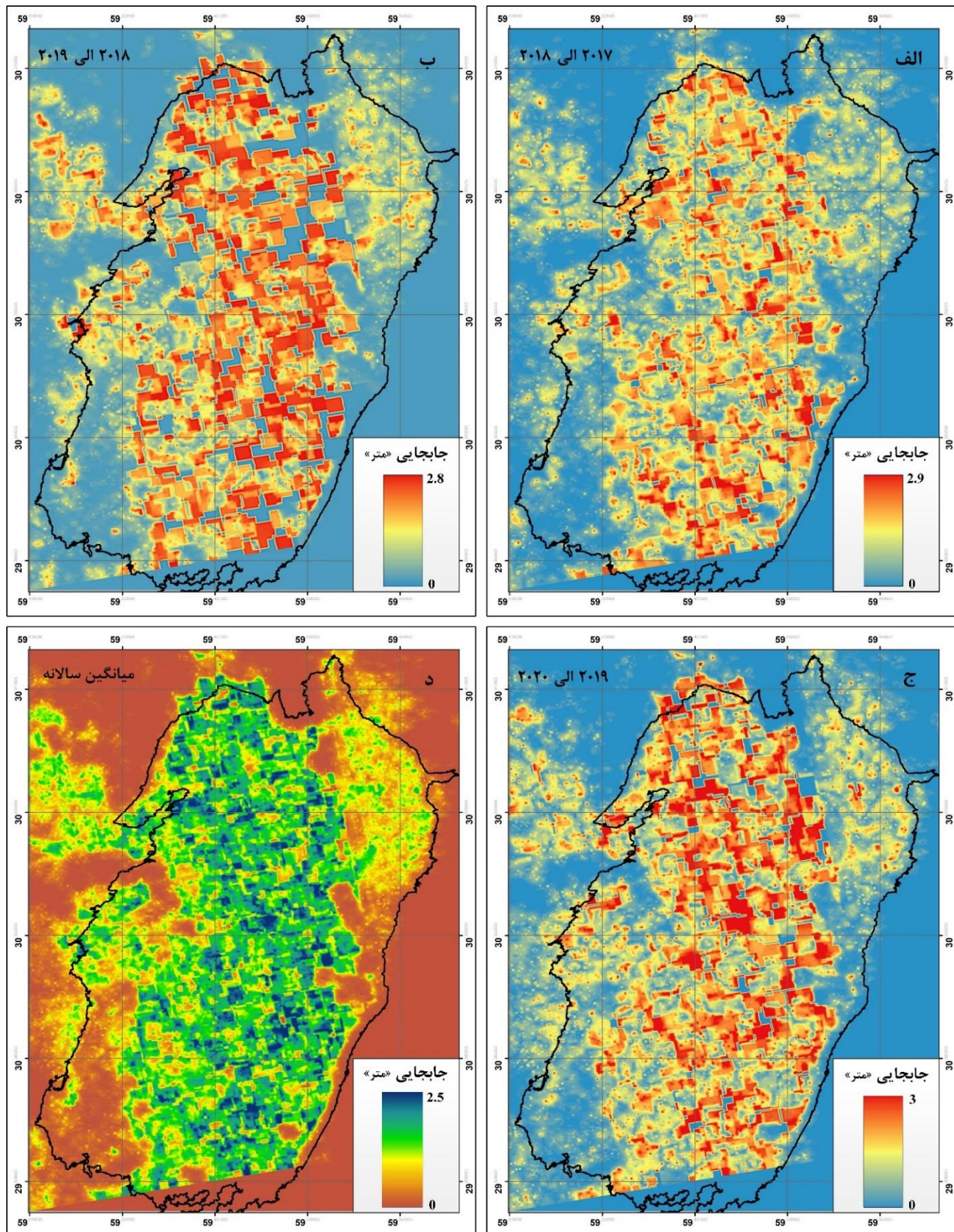
استان کرمان، خراسان رضوی و سیستان و بلوچستان واقع شده است و بزرگترین تپه‌های ماسه‌ای نیز تقریباً در این محدوده است، حرکت تپه‌های ماسه‌ای الگوهای گوناگون و حتی کاملاً متفاوتی نسبت به یکدیگر داشته‌اند. به بیانی دیگر در محدوده ریگ‌یلان به هیچ عنوان نمی‌توان الگوی غالبی برای جابجایی تپه‌های ماسه‌ای بیان کرد.

نکته قابل توجه در مورد پراکندگی مکانی جابجایی تپه‌های ماسه‌ای این منطقه، وابستگی زیاد مقدار مطلق جابجایی‌ها به اندازه تپه‌های ماسه‌ای است. به طوری که همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، مقدار جابجایی تپه‌های ماسه‌ای شمال‌شرق ریگ‌یلان تفاوت قابل توجهی با مناطق مرکزی و داخلی آن دارد (در شکل ۶ پروفیل‌های طولی و عرضی میانگین جابجایی‌های سالانه نشان داده شده است). بر اساس بررسی‌های انجام شده بر روی تصاویر ماهواره‌ای (۵-الف)، می‌توان بیان کرد که کوچکترین و کم‌ارتفاع‌ترین تپه‌های ماسه‌ای در شمال‌شرق ریگ‌یلان مشاهده می‌گردد و با حرکت به سمت داخل و جنوب ریگ به اندازه و ارتفاع این تپه‌ها افزوده می‌شود. این در حالی است که کمترین جابجایی در بین تپه‌های ماسه‌ای این منطقه نیز در همین منطقه شمال‌شرقی ریگ مشاهده می‌گردد (میانگین جابجایی در این منطقه برابر با ۰/۸ متر بر سال است) و سایر تپه‌های داخلی از سرعت قابل توجهی برخوردار هستند (میانگین جابجایی سالانه بخش‌های غربی در حدود ۱/۵ متر بر سال است). اگرچه نمی‌توان به‌عنوان یک قانون کلی این موضوع را بیان کرد، اما به‌طور عمومی در این منطقه تپه‌های ماسه‌ای بزرگ و با ارتفاع قابل توجه از سرعت بیشتری برخوردار هستند و تپه‌های ماسه‌ای کوچکتر و بدون شکل مورفولوژیکی خاص از سرعت کمتری برخوردارند. در مجموع می‌توان بیان کرد که مقدار جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ریگ‌یلان از غرب به شرق کاهش می‌یابد (شکل ۶-ب) اما از شمال به جنوب روند خاصی در افزایش و یا کاهش مقدار جابجایی‌ها مشاهده نمی‌شود (شکل ۶-الف).

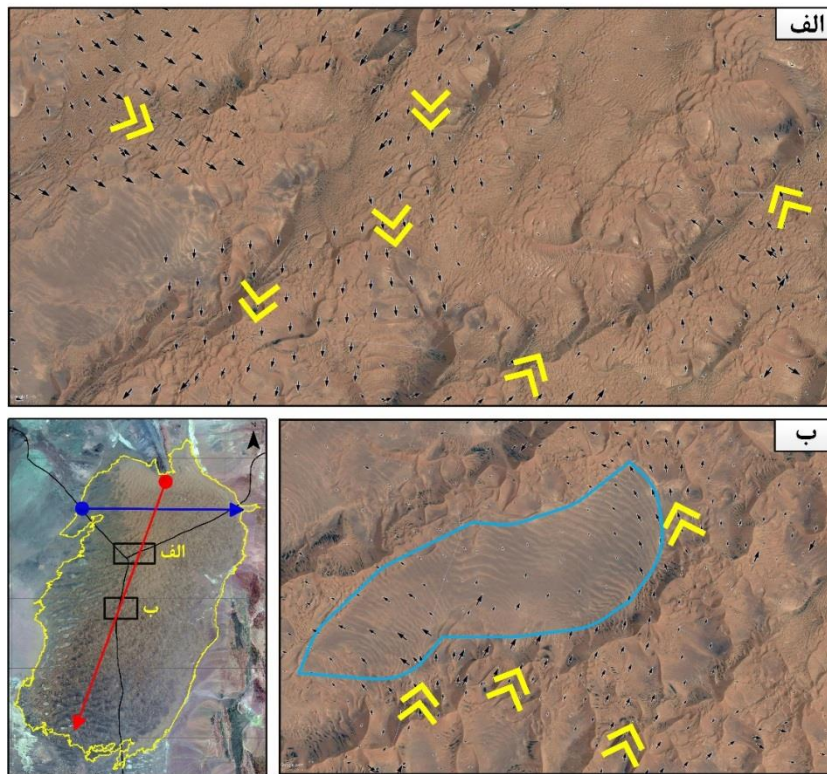
مطالعه قرار داده‌اند. یافته‌های این تحقیق نشان داده است که دو برخان مورد مطالعه به‌طور میانگین در طول ۵۰ سال بین ۱/۹۲ و ۲/۷ متر برسال جابجا شده‌اند. اگرچه منطقه مورد مطالعه در این تحقیق با ریگ‌یلان متفاوت است و از روش‌های کاملاً متفاوتی استفاده شده است، اما اعداد بدست‌آمده در این دو تحقیق تا حدودی با یکدیگر مشابه است و میزان جابجایی‌های ثبت شده در هر دو تحقیق مشابهت بسیار بالایی با یکدیگر نشان می‌دهند.

بر اساس میانگین جابجایی سالانه انجام شده در منطقه مورد مطالعه (شکل ۳-د) می‌توان بیان کرد که کمترین مقادیر جابجایی به‌طور عمده در مناطق حاشیه‌ای که تپه‌های ماسه‌ای وجود ندارند و تنها رسوبات و خاک مشاهده می‌شود اتفاق افتاده است و با حرکت به داخل ریگ و ظهور تپه‌های ماسه‌ای به شدت به مقدار سرعت جابجایی افزوده شده است. این موضوع در مورد منطقه حد فاصل بین تپه‌های ماسه‌ای که فاقد ماسه است و رسوبات و خاک نیز وجود دارد مشاهده می‌گردد. به طوری که در فاصله بین این تپه‌های ماسه‌ای که بستر کوچک ریگ است و فقط رسوبات زمین اصلی وجود دارد، میزان جابجایی‌ها به حداقل مقدار خود نزدیک شده است و تقریباً برابر با صفر است. نمونه‌ای از اینگونه محدوده‌ها در شکل ۴-ب نشان داده شده است (محدوده آبی رنگ). همان‌طور که در این شکل نیز نمایان است، در بخش‌هایی از ریگ که تپه‌های ماسه‌ای مشاهده نمی‌شود و تنها رسوبات و خاک حضور دارند مقدار جابجایی‌ها نیز به صفر رسیده است.

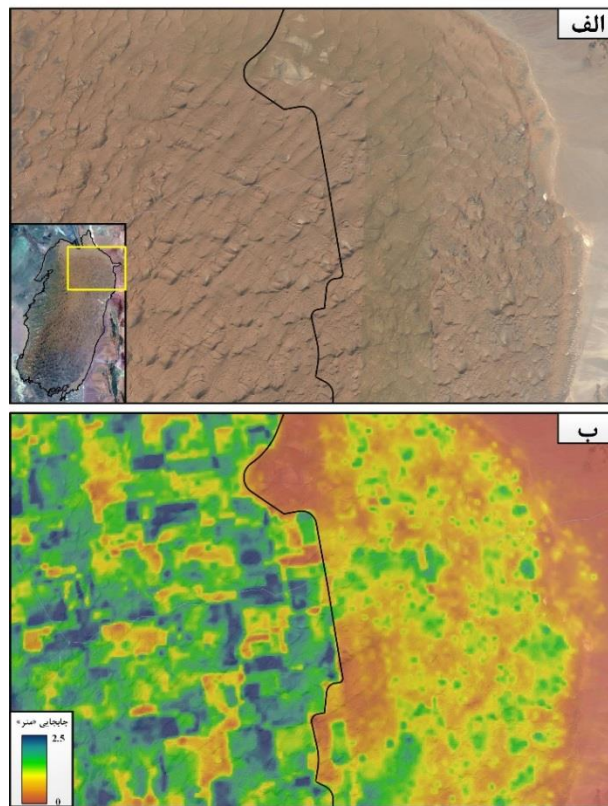
در مورد تپه‌های ماسه‌ای همواره بیان شده است که این تپه‌های ماسه‌ای بر اساس جهت وزش غالب باد هر منطقه‌ای جابجا می‌شوند. اما ازجمله یافته‌های این تحقیق می‌توان به این موضوع اشاره کرد که جابجایی مجتمع‌های ماسه‌ای این منطقه اساساً از یک الگوی ثابت و یکسان پیروی نمی‌کنند و هر بخشی از آن الگو و مسیر متفاوتی را برای جابجایی انتخاب کرده است. همان‌طور که در شکل ۴-الف مشاهده می‌گردد، در مرکزی‌ترین بخش ریگ‌یلان که در محدوده سه



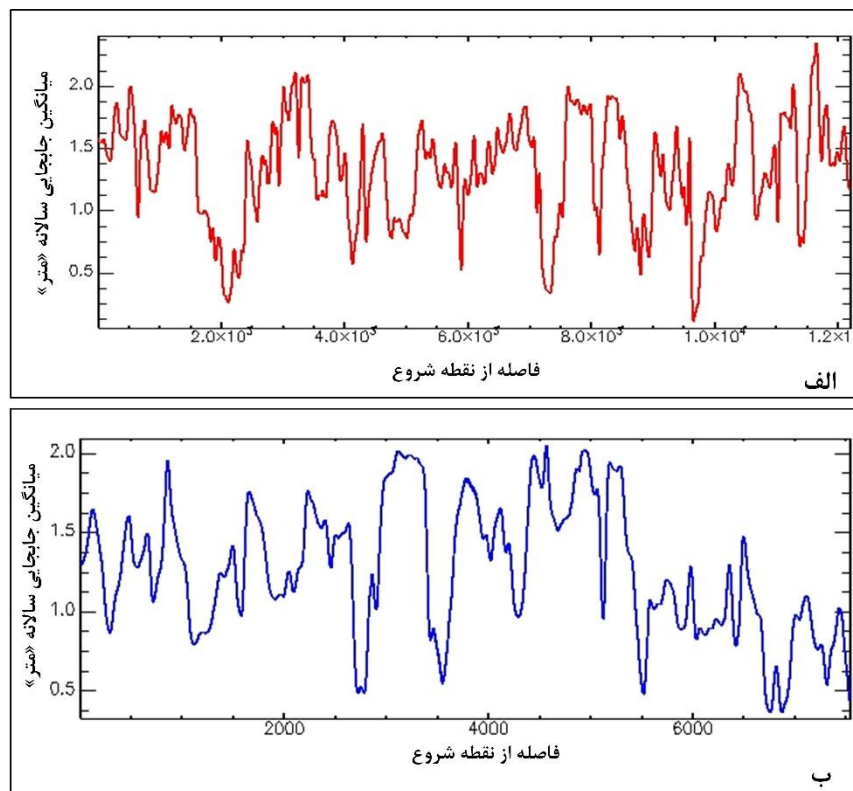
شکل ۳- جابجایی افقی تپه ماسه‌های ریگ‌یلان در فاصله سال‌های (الف) ۲۰۱۷-۲۰۱۸، (ب) ۲۰۱۸-۲۰۱۹، (ج) ۲۰۱۹-۲۰۲۰ و (د) میانگین سالانه



شکل ۴- جهت و شدت جابجایی افقی تپه‌های ماسه‌ای ریگ‌یلان در دو منطقه نمونه



شکل ۵- جهت و شدت جابجایی افقی تپه‌های ماسه‌ای ریگ‌یلان در دو منطقه نمونه



شکل ۶- الف: پروفیل طولی (شمال به جنوب) و ب: پروفیل عرضی (غرب به شرق) میانگین جابجایی سالانه ریگ یلان (متر بر سال) موقعیت مکانی پروفیل‌های مربوطه در شکل ۴ نشان داده شده است.

بحث

تطابق بین دو تصویر را با به حداکثر رساندن همبستگی نرمال متقابل بدست می‌آورد.

نتایج بدست آمده نشان داد که تپه‌های ماسه‌ای منطقه مورد مطالعه در طول سال از صفر تا حداکثر ۳ متر در سال امکان جابجایی و تغییر دارند. حداکثر جابجایی‌ها اغلب در بزرگترین و مرتفع‌ترین تپه‌های ماسه‌ای مشاهده می‌گردد و با کاهش اندازه و وسعت تپه‌های ماسه‌ای از سرعت تغییرات آنها نیز کاسته می‌شود. برخلاف انتظار این جابجایی‌ها در کل ریگ یلان در یک راستای ثابت و مشخص اتفاق نیفتاده است و در هر بخشی از آن متناسب با وضعیت مورفولوژیکی، جهت‌گیری یال‌ها و همچنین اندازه و ارتفاع تپه‌های ماسه‌ای سوگیری‌ها و جابجایی‌های متفاوتی نیز مشاهده می‌گردد. بنابراین اگرچه عامل محرکه اصلی جابجایی این تپه‌های ماسه‌ای شدت و جهت وزش باد غالب هر منطقه است، اما به نظر می‌رسد نحوه سوگیری این

هدف از این تحقیق ارزیابی میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای یکی از بزرگترین مجتمع‌های ماسه‌ای جهان، ریگ یلان است. برای دستیابی به این هدف از تصاویر راداری ماهواره Sentinel-1 که جزو ماهواره‌های راداری محسوب می‌گردد استفاده شد. در این راستا از چهار تصویر ماهواره مورد اشاره در سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ استفاده گردید. اگرچه تکنیک‌های مختلفی برای برآورد جابجایی عوارض مختلف سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (به‌ویژه تصاویر ماهواره‌ای راداری) طراحی و پیاده‌سازی شده است، اما در این تحقیق از روش ردیابی انحراف (Offset Tracking) استفاده شد. در این روش مقدار جابجایی‌های افقی با محاسبه میزان انحراف یا همبستگی بین دو تصویر راداری که به‌صورت مشترک از یک منطقه گرفته شده‌اند محاسبه می‌شود. این روش بهترین

منابع مورد استفاده

- Abbasi, H.R., Opp, C., Groll, M., Rohipour, H. and Gohardoust, A., 2019. Assessment of the distribution and activity of dunes in Iran based on mobility indices and ground data. *Aeolian Research*, 41: 1-17.
- Abdelkareem, M., Gaber, A., Abdalla, F. and El-Din, G.K., 2020. Use of optical and radar remote sensing satellites for identifying and monitoring active/inactive landforms in the driest desert in Saudi Arabia. *Geomorphology*, 362: 1-14.
- Arabameri, A., Karami, J., Shayan, S. and Kolorajan, A., 2015. Simulation of Barchans movement for managing planning using artificial neural network (Case study: Haj Ali Gholi playa). *The Journal of Spatial Planning*, 18 (4): 149-175.
- Berardino, P., Costantini, M., Franceschetti, G., Iodice, A., Pietranera, L. and Rizzo, V., 2003. Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy). *Engineering Geology*, 68(2): 31-51.
- Cia, J., Wang, C., Mao, X. and Wang, Q., 2017. An adaptive offset tracking method with SAR Images for Landslide displacement monitoring. *Journal of Remote Sensing*, 9(8): 1-16.
- Goldstein, R.M., Engelhardt, H., Kamp, B. and Frolich, R.M., 1993. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an antarctic ice stream. *Science*, 262(5139): 1525-1530.
- Goudarzi, M., Farahpour, M. and Mosavi, A., 2006. Land cover and rangeland classification map using Land sat satellite image (TM) (Case study) Namrood watershed. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 13(3): 265-277.
- Huang, L. and Li, Z., 2011. Comparison of SAR and optical data in deriving glacier velocity with feature tracking. *International Journal of Remote Sensing*, 32: 2681-2698.
- Karimi, N. and Namdari, S., 2019. Estimation of severity and extent of desertification in Iran using Landsat satellite images and spectral mixture analyses methods during 1984 and 2015. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 26(2): 500-515.
- Kumar, V., Venkataraman, G., Høgda, K.A. and Larsen, Y., 2013. Estimation and validation of glacier surface motion in the northwestern Himalayas using high-resolution SAR intensity tracking. *International Journal of Remote Sensing*, 34(15): 5518-5529.
- Li, J., Li, Z.W., Ding, X. L., Wang, Q.J., Zhu, J.J. and

جابجایی‌ها و شدت آنها تا حدودی تحت تأثیر سایر عوامل محلی باشد. معنای دیگر این سخن آن است که تپه‌های ماسه‌ای منطقه مورد مطالعه بیشتر از آنکه تحت تأثیر جابجایی واقعی افقی باشند، بیشتر دچار تغییر شکل و تغییر فرمی دائمی هستند.

شایان ذکر است که اگرچه اندازه‌گیری فعالیت تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از مدل‌های مختلف ژئومورفولوژیکی از سابقه نسبتاً زیادی برخوردار است، اما تا قبل از توسعه فناوری‌هایی همانند سنجنش از دور (به دلیل محدودیت‌های قابل توجه فعالیت‌های میدانی در محدوده تپه‌های ماسه‌ای)، مطالعات جامعی در مورد اندازه‌گیری مستقیم و کمی اینگونه تپه‌های ماسه‌ای انجام نشده است. اما امروزه با در اختیار داشتن طیف بسیار وسیعی از انواع تصاویر ماهواره‌ای اپتیکی و راداری، نه تنها می‌توان تغییرات اینگونه عوارض دینامیک را با قاطعیت به اثبات رساند، بلکه به صورت کمی نیز تغییرات زمانی و مکانی آنها را می‌توان در دوره‌های زمانی گوناگون مورد پایش قرار داد. بدیهی است ترکیب علم سنجنش از دور با سایر علوم زمینی نه تنها می‌تواند در تأیید یا رد فرضیه‌های قبلی مطرح شده کارگشا باشد، بلکه حتی می‌تواند در علت‌یابی بسیاری از عوامل ناشناخته بسیاری از پدیده‌های مرتبط به این علوم نیز کمک‌رسان باشد. اما نکته مهم در مورد این تحقیق و همچنین تحقیق‌های مشابه دیگر، عدم امکان ارزیابی میزان دقت روش و داده‌های مورد استفاده به صورت کمی است. زیرا تنها راه ارزیابی دقت اینگونه تکنیک‌ها، در اختیار داشتن داده‌های میدانی مناسب است که ناگفته پیداست برای دستیابی به چنین داده‌های میدانی، باید عملیات‌های میدانی بسیار گسترده و با دامنه و توالی فراوانی انجام داد که این امر نیازمند یاری سازمان‌ها و ارگان‌های متولی امور بیابان‌های کشور است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از داوران محترم و ناشناسی که زحمت داوری این مقاله را بر عهده داشتند و با نظرات ارزشمند خود بر غنای آن افزودند تشکر و سپاسگزاری می‌گردد.

- Song, Y., Chen, C., Xu, W., Zheng, H., Bao, A., Lei, J., Luo, G., Chen, X., Zhang, R. and Tan, Z., 2020. Mapping the temporal and spatial changes in crescent dunes using an interferometric synthetic aperture radar temporal decorrelation model. *Aeolian Research*, 46: 100616.
- Squarzon, C., Delacourt, C. and Allemand, P., 2002. Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. *Engineering Geology*, 68(2): 53-66.
- Wang, C., Mao, X. and Wang, Q., 2016. Landslide displacement monitoring by a fully polarimetric SAR offset tracking method. *Remote Sensing*, 8(8): 1-13.
- Winsvold, S.H., Kääb, A., Nuth, C.A., Andreassen, L.M., Van Pelt, W.J.J. and Schellenberger, T., 2018. Using SAR satellite data time series for regional glacier mapping. *The Cryosphere*, 12(3): 867-890.
- Yan, S., Guo, H., Liu, G. and Fu, W., 2013. Monitoring Muztagh Kuksai Glacier surface velocity with L-band SAR data in southwestern Xinjiang, China. *Environmental Earth Sciences*, 70(7): 3175-3184.
- Yan, S., Ruan, Z., Liu, G., Deng, K., Lv, M. and Perski, Z., 2016. Deriving Ice Motion Patterns in Mountainous Regions by Integrating the Intensity-Based Pixel-Tracking and Phase-Based D-InSAR and MAI Approaches: A Case Study of the Chongce Glacier. *Remote Sensing*, 8(7): 1-15.
- Khosroshahi, M., Kali, R.A. and Marandy, H.M., 2011. Comparison of geological and climatological deserts domain of Iran. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 18(2): 336-352.
- Wang, C. C., 2014. Investigating mountain glacier motion with the method of SAR intensity-tracking: Removal of topographic effects and analysis of the dynamic patterns. *Earth-Science Reviews*, 138(1): 179-195.
- Luckman, A., Murray, T. and Jiskoot, 2003. Ers sar feature tracking measurement of outlet glacier velocities on a regional scale in east greenland. *Annals of Glaciology*, 36(1): 129-134.
- Luckman, A., Murray, T., de Lange, R. and Hanna, E., 2006. Rapid and synchronous icodynamic changes in East Greenland. *Geophysical Research Letters*, 33: L03503.
- Maghsoudi, M., Baharvand, M., Mahboobi, S., Khanbabaei, Z. and Mohammadi, A., 2018a. Analysis of Barchan morphology in the west of Loot desert using morphometric features. *Geographical Research on Desert Area*, 6(1): 175-197.
- Maghsoudi, M., Mohamadi, A., khanbabaei, Z., Mahboobi, S., Baharvand, M. and Hajizadeh, A., 2018b. Reg movement monitoring and Barchans in West of Lot region (Pashoeyeh). *Quantitative Geomorphological Research*, 5(4): 176-189.
- Massom, R. and Lubin, D., 2006. *Polar Remote Sensing, Volume II: Ice Sheets*. Springer Praxis Books, Chichester. 426.
- Negaresh, H. and Latifi, L., 2008. Geomorphological analysis of dunes drifting process in the East of Sistan Plain during recent draughts. *Geography and Development Iranian Journal*, 6(12): 43-60.
- Sánchez-Gómez, P. and Navarro, F., 2017. Glacier surface velocity retrieval using D-InSAR and offset tracking techniques applied to ascending and descending passes of sentinel-1 Data for Southern Ellesmere Ice Caps, Canadian Arctic. *Remote Sensing*, 9(442): 1-17.

Monitoring the movement of windy sand dunes of Rige Yalan in the Loot desert using SAR satellite images

N. Karimi^{1*}

^{1*}-Corresponding author, Water Resources Research Department, Water Research Institute, Tehran, Iran, Email: n.karimi@wri.ac.ir

Received:07/18/2020

Accepted:11/13/2020

Abstract

One of the most important features of the desert areas of Iran is the existence of windy sand dunes, which their dynamics and movement over time have distinguished them from many other geomorphological phenomena. The main objective of the present study is to evaluate the displacement of sand dunes in one of the largest sand complexes in the world, Rig Yalan in the east of the Loot desert. For this purpose, Sentinel-1 satellite images, which are considered SAR satellites, were used. In this regard, four Sentinel-1 satellite images were used at the beginning of summer 2017, 2018, 2019, and 2020. The offset tracking method was used to estimate the displacement of sand dunes in the study area. In the Offset Tracking method, the amount of horizontal displacements is measured by calculating the amount of deviation or correlation between two radar images taken from the same area. In this approach, the best match between the two images is achieved by maximizing the normalized cross-correlation. Based on the obtained results, during the study period, the amount of displacement of Yalan sand dunes in the closed and non-mobile areas has been up to a maximum of 3 meters per year in the large sand pyramids of the region, which are mainly concentrated in the center, west and south of the area. The movement of huts, ripple marks, longitudinal and transverse hills, and finally interconnected funnel-shaped sand pyramids of Yalan sand has not occurred in a fixed and definite direction and each part of it according to the morphological condition, the orientation of ridges as well as hill size and height different biases and displacements are observed. Based on the obtained results, all the features of the sand in Yalan sand are displaced on average about 0.94 meters per year.

Keywords: Remote sensing, sand dune, Barchan, horizontal displacement, SAR Image, Offset Tracking.